

Forskning och Utveckling för framtida stombyggnadsteknik



Ingemar Löfgren
Industridoktorand AB Färdig Betong
Institutionen för konstruktionsteknik – Betongbyggnad
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg.
Ingemar.lofgren@ste.chalmers.se



Mathias Johansson, Tekn. Dr, Projektassistent
Institutionen för konstruktionsteknik – Betongbyggnad
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg.
mathias.johansson@ste.chalmers.se

Inledning

Utveckling av ett resurssnålt och industriellt byggande är nödvändigt för att möta de problem och brister som finns inom byggindustrin. Ökade krav på produktivitet och kvalitet i byggbranschen har aktualiserat behovet av forskning. Forskning som erfordras för att skapa förutsättningar för ett resurssnålt betongbyggande. Forskning och utvecklingen kan bidra till ökad produktivitet, förbättrad kvalitet, kortare byggtider, bidra till en förbättrad arbetsmiljö och inte minst till ett uthålligt betongbyggande genom ett effektivare materialutnyttjande. Det är emellertid viktigt att utvecklingen sker i nära samverkan mellan forskningsområdena material, konstruktion och produktion – liksom branschen har lidit av att ha varit fragmenterad så har även forskningen. För det är ju så att även om byggbranschen har genomgått stora förändringar och en betydande utveckling har skett under årens lopp finns det fortfarande mycket kvar att göra. Beställare och myndigheter ser idag med oro på att byggindustrin levererar ojämn kvalitet och att åtskilliga projekt inte klarar tidplan eller budget. Ett flertal studier av byggindustrin pekar på allvarliga brister som snarast behöver åtgärdas. Följaktligen, en förändring är nödvändig om byggandet skall effektiviseras, bli mer kostnadseffektivt och om kvaliteten skall kunna höjas.

Avsikten med artikeln är att exemplifiera forsknings- och utvecklingsmöjligheter för framtida stombyggnadsteknik. I artikeln kommer exempel ges från aktuell forskning som pågår vid Institutionen för konstruktionsteknik på Chalmers men även utbildningsfrågor kommer att beröras.

Forskning

Verksamheten vid Institutionen för konstruktionsteknik – Betongbyggnad omfattar konstruktionsaspekter avseende utformning på bärande betongkonstruktioner avseende bärförmåga, stabilitet, funktion och beständighet. Avancerade analysmetoder utvecklas och används tillsammans med laboratorieexperiment för en bättre förståelse av konstruktionernas mekaniska verkningssätt och funktion. Detta leder till allt säkrare och effektivare metoder för dimensionering och konstruktiv utformning.

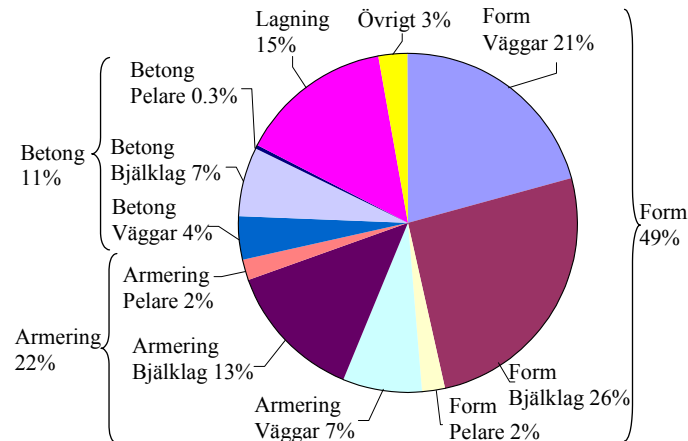
Kunskapen om betong och betongkonstruktioners verkningssätt är idag stor, men det finns även stora brister och vissa kunskapsluckor. Framförallt så finns det ett stort glapp mellan forskningen och de normer och den praxis som dagens konstruktörer arbetar efter. Men det finns även ett stort glapp mellan den materialutveckling som sker och de beräkningsmodeller som normerna bygger på. Att det finns vissa brister tydliggörs när ny teknik implementeras utan att detta beaktas och innan hela processen är förberedd. Detta kan exempelvis iakttas i den utveckling som sker inom betongbyggandet. Generellt, produktionscykeln kortas, konstruktionerna blir slankare och nya material och materialsammansättningar introduceras. Bland annat så ökar användning av betong med lågt *vct*; efterfrågan av en snabb hållfasthetstillväxt ökar och det finns krav på att använda restmaterial i betongen (t ex krossmaterial) vilket leder till nya betongsammansättningar; pastavolymen ökar i förhållande till ballasten. Detta leder i sin tur till snabbare hydratation och en större värmeutveckling; större kemisk krympning; ökad sprickrisk och ökad sprödhet. Men även när nya material, till exempel höghållfast-, lättballast- och fiberarmerad betong, introduceras tydliggörs bristerna eftersom vissa grundläggande materialegenskaper förändras.

Dessutom har det varit en stor fokus på att beskriva och kontrollera konstruktioners verkningssätt i brottgränstillstånd – för att säkerställa bärförmåga, stabilitet, etc. Men i takt med att förutsättningarna ändras och att det finns ett behov av att kunna göra rimliga livscykelanalyser behövs nya modeller. Med kortare produktionscykler, slankare konstruktioner och starkare och bättre material kan det innebära att det är verkningssättet i bruksgränstillstånd som blir avgörande. Effekter eller materialegenskaper som tidigare försumats, eftersom de haft en marginell inverkan, kan plötsligt bli avgörande för konstruktionens prestanda.

Emellertid är stombyggnad inte bara ett konstruktionstekniskt problem utan det är även ett logistiskt problem. Effektiv stombyggnadsteknik fås genom beaktandet av båda dessa problem. Dessutom påverkas det strukturella beteendet av hur stommen uppförs, tid för pålastning, härdningsförhållande, etc. I det följande avsnittet belyses detta med två exempel bjälklag och samverkanspelare.

Bjälklag

Det är allmänt känt att för platsgjutna stommar är projekts ekonomi oftast relaterat till valet av formsystem och hur väl detta utnyttjas. Formarbetet är den aktivitet som kräver den största arbetsinsatsen, vilket framgår i Figur 1. Även formbyggandet har genomgått en omfattande utveckling. Från att från början bestått av lösvirke (vilket krävde en stor arbetsinsats) har mer avancerade formsystem utvecklats, se Figur 2. Framstegen inom formtekniken är även den starkt kopplad till materialsidan, dagens formsystem är lätta (tack vare höghållfast stål och aluminium) och levereras med genomtänkta monteringsdetaljer.



Figur 1. Fördelning av arbetskostnad för platsgjuten stomme, Betongbanken [1].

De första kvarsittande formsystem introducerades på 1920-talet i USA, korrugerad plåt. De användes ursprungligen som en 'förlorad form' för att spara in på formrivnings- och rengörings kostnader. Tack vare omfattande forskning blev det till slut möjligt att utnyttja formen även konstruktivt, som en samverkansform. De första kvarsittande formsystem av betong utvecklades i Tyskland och i början av 1960-talet patenterades filigran systemet (kallas numera plattbärlag i Sverige, se Figur 2).



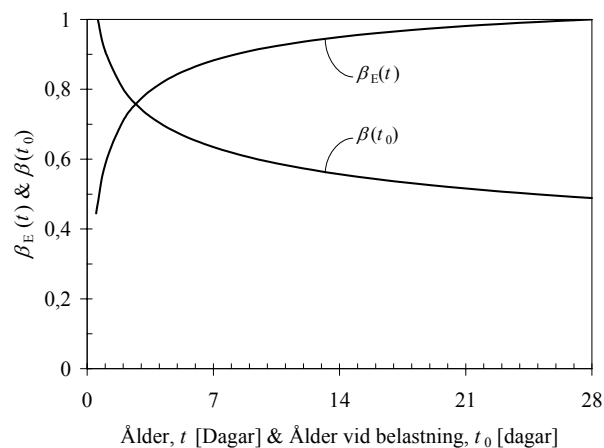
Figur 2. (a) & (b) Exempel på traditionell form (från PERI). (c) Exempel på kvarsittande formsystem, plattbärlag.

Det finns ett antal faktorer som styr valet av bjälklagssystem, bland annat så kan det finnas krav och önskemål som: stora spännvidder; flexibla stomlösningar; en kort produktionscykel med tidig formrivning; snabb uttorkning av betongen; ett ohindrat byggande där mängden stämp och temporära konstruktioner minimeras; ett byggande som är resurssnålt och hållbart ur miljöhänsyn. Dessutom så spelar givetvis de ekonomiska förutsättningarna en stor roll. En studie genomfördes nyligen där de ekonomiska konsekvenserna avseende uttorkning och byggfukt undersöktes, se [2]. Det visade sig att det ofta lönade sig att utnyttja en hög betongkvalitet eftersom denna förkortar tiden för uttorkning och formrivning kan ske tidigare, vilket överväger den högre materialkostnaden. Studien påvisade också att bjälklag med plattbärlag är ekonomiskt på grund av att kortare byggtid. För att få den bästa totalekonomin är det viktigt att beslut tas tidigt i projektet, i samråd mellan entreprenör, konstruktör och leverantör, så att betongens värdeskapande egenskaper kan utnyttjas optimalt.

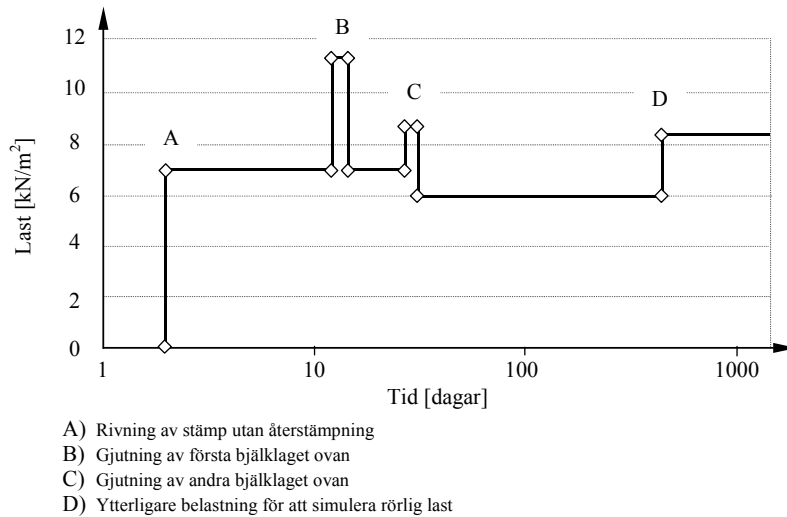
Att valet av formsystem har en stor inverkan inses om man beaktar de logistiska problem som kan uppstå på arbetsplatsen, se Figur 3, och det arbete som krävs för att montera och riva bockryggar och stämp. Men det är också så att valet av byggmetod och det tillvägagångssätt som väljs påverkar bjälklagets belastningshistoria och deformation. En tidig formrivning innebär att bjälklaget belastas innan betongen har hunnit uppnå sin fulla hållfasthet och detta leder till ökade deformationer. Detta beror dels på att betongens elasticitetsmodul utvecklas med tiden och dels på att krypdeformationen ökar vid tidig belastning, se Figur 4. En tidig formrivning och en kort produktionscykel innebär också att bjälklaget redan innan det uppnått sin fulla hållfasthet utsätts för höga belastningar, se Figur 5.



Figur 3. Hur det kan se ut på en arbetsplats, stämning av bjälklag.

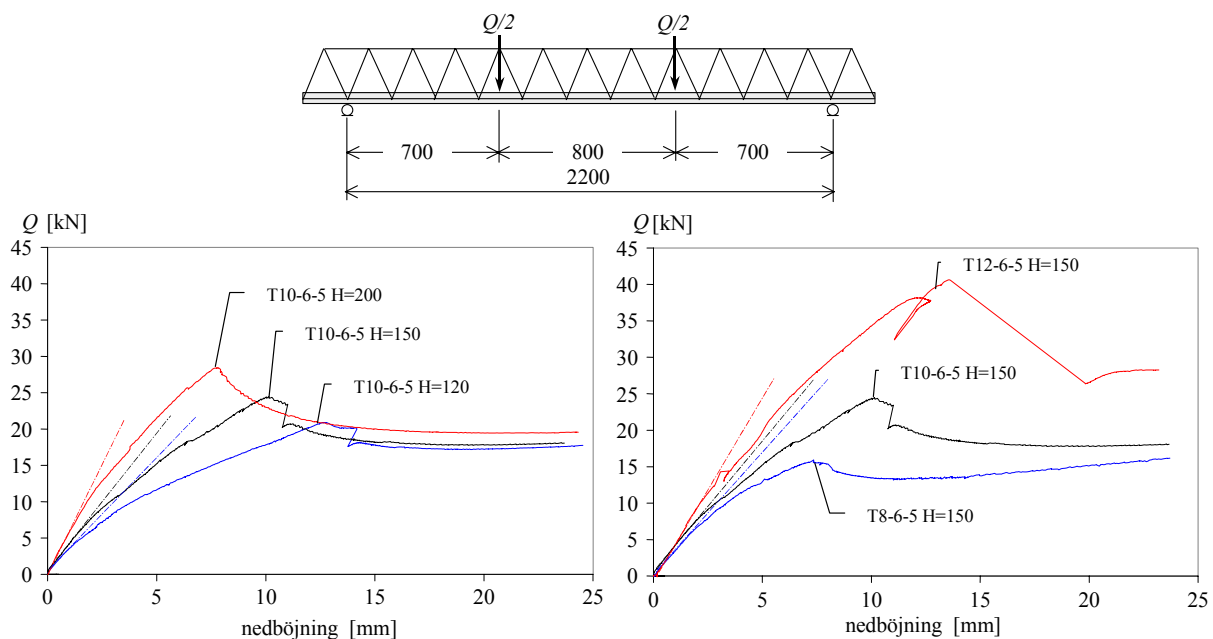


Figur 4. Utveckling av betongen elasticitetsmodul, $\beta_E(t)$, och hur betongens ålder vid pålastning inverkar på kypningen, $\beta(t_0)$.

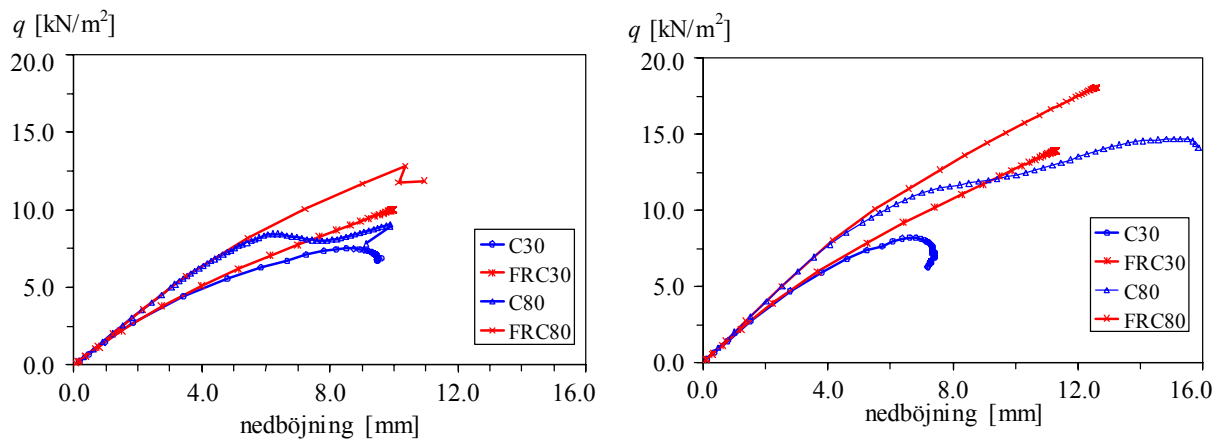


Figur 5. Lasthistoria för ett bjälklag i Cardington projektet, byggdes utan återstämning [3].

Inom ett pågående doktorandprojekt på Institutionen för konstruktionsteknik – Betongbyggnad, Chalmers, studeras principer och metoder för industriellt platsgjutet byggande. Projektet är ett samarbete mellan AB Färdig Betong och Chalmers. Inom projektet har en förstudie genomförts, där, bland annat, fördelningen av byggkostnader har analyserats och ny teknik har inventerats. Inom ramen för projektet har plattbärlag, ett kvarsittande-formsystem, studerats. Försök och analyser har genomförts för att undersöka det mekaniska verkningssättet och utvecklingsmöjligheter har exemplifierats genom att studera inverkan av olika materialegenskaper, se Figur 6 och Figur 7. Mer information kan fås i [4], [5] och [6]. Det fortsatta arbetet fokuseras på fiberarmerad betong och hur denna kan användas i bärande konstruktioner. Fiberbetong ses som en innovation som möjliggör att platsgjutna betongstommar kan uppföras enklare och mer industriellt vilket ökar dess konkurrenskraft, men mer om detta senare.



Figur 6. Försök gjorda på plattbärlag för att undersöka det mekaniska verkningssättet. (a) Inverkan av armeringsstegens höjd. (b) Inverkan av överkantstångens diameter.



Figur 7. Jämförelse av inverkan av olika material – normalbetong (C30), höghållfast betong (C80), och motsvarande fiberbetonger (FRC30 och FRC80). (a) T10-6-5, spännvidd 2,6 m och (b) T12-6-5, spännvidd 2,6 m.

Samverkanspelare

Uppförandet av kompletta samverkanskonstruktioner indikerar en ny utveckling i byggnadsteknologin, särskilt i industri- och kontorsbyggnader. Fördelarna med samverkanskonstruktioner är många; förtillverkning, enkel montering, reducerad monterings tid (jämfört med betong) och därför även minskad byggkostnad. Samverkanskonstruktioner av stål och betong utvecklades i början av det förra seklet som ett sätt att brandskydda stål. Det bärande stålet inneslöt i betong med låg hållfasthet, som fungerade brandskyddande, det var inte förrän senare som andra konstruktiva fördelarna så som ökad styvhet och bärförmåga upptäcktes.

Pelare har traditionellt sett utförts antingen som rena stålpelare eller som armerade betongpelare. Dessa har båda sina för och nackdelar. Genom att förena dessa i många avseende olika världar kan man kombinera betongens och stålets fördelar och erhålla en "samverkanspelare" som utnyttjar respektive material på ett så optimalt sätt som möjligt. Även önskemål om ökad flexibilitet i byggandet och pelare med högre bärförmåga kan tillgodoses. Genom att använda höghållfast betong ökar potentialen för samverkanspelare ytterligare eftersom man då utnyttjar den relativt billiga betongen mer effektivt och därmed kan minska mängden av det dyrare stålet – samtidigt som pelarens tvärsnitt kan minskas och därigenom även öka den användbara golvytan. I ett doktorandprojekt på Institutionen för konstruktionsteknik – Betongbyggnad, Chalmers, har samverkanspelare bestående av betongfyllda stålrör studerats. Huvudsyftet har varit öka förståelsen för det mekaniska vekningssättet samt att uppnå ett effektivt utnyttjande av höghållfast betong. Ett vanligt problem med forskningsprojekt är att de ofta mycket intressanta resultat som framkommer har svårt att finna tillämpning i den vanliga byggvardagen. För att underlätta detta har ett projekt finansierat av SBUF genomförts inom FoU-Väst i anslutning till nämnda doktorandprojekt. Det har utförts i samarbete mellan NCC AB, AB Färdig Betong och Institutionen för konstruktionsteknik, Chalmers. Syftet har varit att verka som en länk mellan högskolan och näringslivet genom att med en helhetssyn behandla praktiska aspekter vid användandet av samverkanspelare.

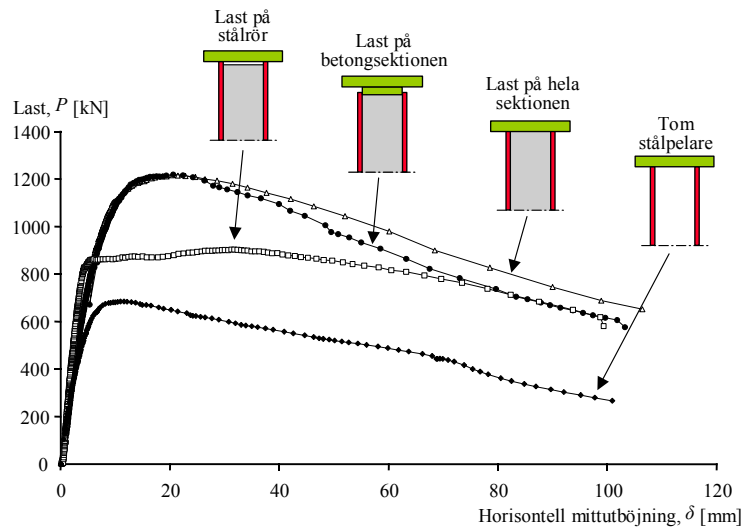
Att använda samverkanspelare – betongfyllda stålrör – i stället för traditionella stålpelare eller armerade betongpelare har visat sig kunna medför både ekonomiska och konstruktiva fördelar. Betongkärnan i samverkanspelaren är idealisk för att bära stora tryckkrafter samtidigt som

spröda brott – vilket ofta associeras med höghållfast betong – kan undvikas eftersom betongen är helt omsluten av stålroret. Då stålroret både utgör gjutform under själva betonggjutningen och slutligen även verkar som armering av den härdade betongkärnan kan stora besparingar göras, både i material och i arbetstid. Betongen skyddas även från mekaniska skador tack vare stålskalet. Detta sammantaget säkerställer även en ökad kvalitet och minskat behov av efterlägningsarbete. Som kan konstateras i Figur 1 så står just arbetet med form, armering och efterlagning för den större delen av arbetskostnaden för en platsgjuten betongpelare. En ytterligare fördel är att man kan minska eller helt undvara brandskyddet (jämfört med stålpelare) eftersom betongen har bättre förmåga att motstå höga temperaturer jämfört med stål. Vidare finns stora möjligheter att utveckla ett rationellt och effektivt stombyggande vilket i sig ger ett antal vinster. Den dyra stålstommen kan byggas först, dimensionerad för att enbart bära egenvikter och laster under byggtiden. Byggnation av stålstommen kan därmed fortskrida och igjutningen av stålroren kan sedan successivt utföras på lägre våningsplan och samordnas med andra gjutarbeten. Den slutliga samverkanspelaren som erhålls när betongen härdad och stålroret och betongkärnan verkar som en enhet, är dimensionerad att bära såväl de nyttiga lasterna som egenvikterna. Detta medför att produktionstakten markant kan ökas, eftersom man inte är beroende av att betongen har uppnått en viss hållfasthet, samt att problemet med ökade långtidsdeformationer på grund av tidig belastning av betongen reduceras. I Figur 8 ses exempel på betongfyllning av samverkanspelare samt olika stadier i byggskedet.



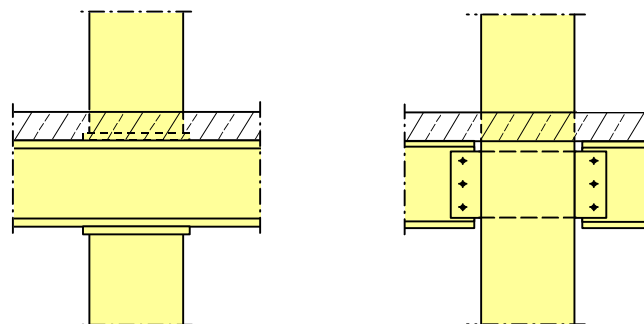
Figur 8. Fyllning av fyravåningshöga samverkanspelare samt olika stadier av byggprocessen i projektet Sørkedalsveien 6 (foto NCC Norge).

Vid dimensionering samverkanspelare antas fullständig samverkan mellan betongen och stålet. Detta kan vara svårt att uppnå i områden där koncentrerade laster angriper pelaren. Därför krävs oftast i praktiken möjlighet till lastöverföring, vilket uppnås genom att antingen förlita sig på den naturliga vidhäftningen mellan stål och betong eller genom mekaniska skjuvöverförare inuti stålroret. För de relativt små tvärsnitt som ofta blir möjliga med betongfyllda stålörspelar är det av stort ekonomiskt och praktiskt intresse att försöka undvika skjuvöverförare i möjligaste mån och sålunda förlita sig till den naturliga vidhäftningen istället. Det har konstaterats att vidhäftningskapaciteten kan ha markant inverkan på bärförmågan och det strukturella verkningssättet - beroende på hur lasten förs på pelaren. Vidare så ökar kravet på lastöverföring i och med att betong med högre tryckhållfasthet används. Detta får konsekvenser för utformningen av anslutningsdetaljerna. I Figur 9 illustreras ett exempel på effekten av olika lastpåföringar till en våningshögt pelare. För man in lasten på hela tvärsnittet utnyttjas pelaren optimalt.



Figur 9. Pelarens bärförmåga beroende på lastpåföring.

Generellt har det visat sig att man inte bör förlita sig till den naturliga vidhäftningen om man använder anslutningsdetaljer som enbart för in last till stål-röret eller till betongkärnan. För att erhålla fullständig samverkan så krävs en anslutningsdetalj som förhindrar relativa rörelser mellan stålet och betongen. Det finns ett antal sådana möjliga lösningar på anslutningsdetaljerna; två av de enklaste koncepten är att använda en topp/fotplåt eller ett knivupplag, beroende på om pelaren är våningshöghög eller kontinuerlig, se Figur 10. För mer information se [7].



Figur 10. Möjlig anslutningsdetalj för en våningshöghög pelare (topp- och fotplåt) samt för en kontinuerlig pelare (knivupplag) som säkerställer en tillfredställande lastfördelning.

Utveckling

Den förändringsprocess som pågår inom byggindustrin innebär en allt större kundanpassning, där flexibilitet, effektiv produktion och rätt kvalitet till rätt pris, är ledord. Dessutom utvecklas stombyggnadsteknik för effektiv och resurssnål produktion med system som har en större produktionsanpassning. De drivkrafter som ligger bakom utvecklingen kan troligtvis främst hänföras till ekonomiska aspekter. Emellertid har det i detta varit en sneddriven fokus på den initiella kostnaden vilket, i takt med att komplexiteten ökat, har medverkat till fragmentering av branschen och bidragit till det nuvarande läget. Inom hus- och kontorsbyggnad har det skett en förskjutning som medfört en ökad betydelse, och kostnad, för installationer och servicefunktioner. Detta innebär att stommens relativa kostnad har minskat och det har blivit allt

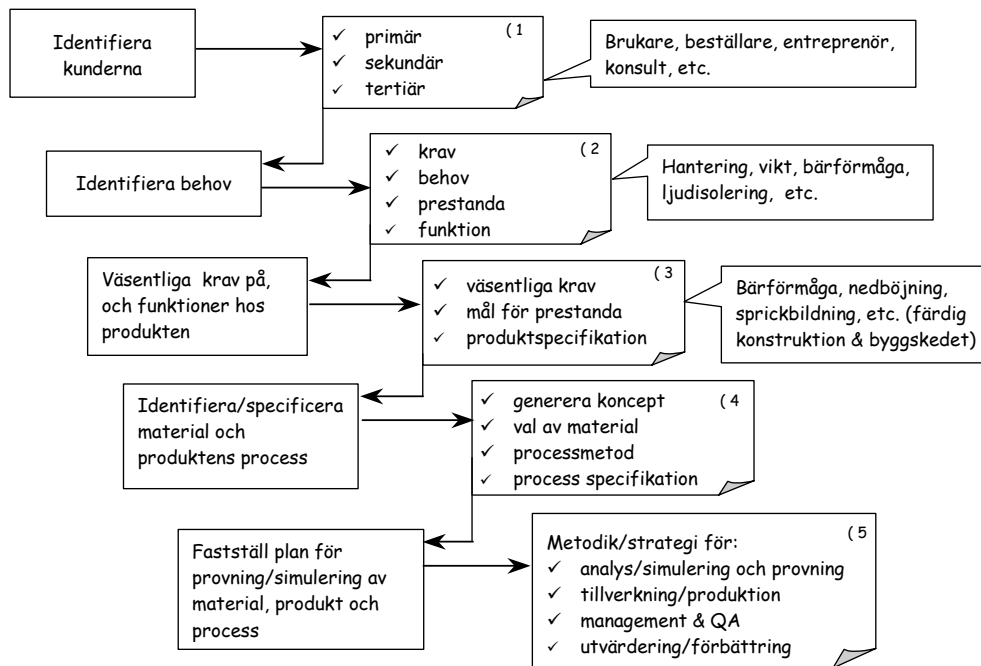
viktigare att denna anpassas till alla installationer. Men förändringsprocessen medför också en förändrad roll och nya arbetssätt för konstruktören, samtidigt som projekteringsverktyg utvecklats utvecklas och erbjuder nya möjligheter.

Vilka utvecklingstendenser går det att identifiera och i så fall vilken FoU inriktning skall företagen satsa på. En intressant studie genomfördes i Storbritannien, projektet ACTIVE [8], där personer anknutna till betongindustrin (arkitekter, konstruktörer, entreprenörer, leverantörer, tillverkare, beställare, etc.) fick besvara en frågeformulär. Över 2000 formulär distribuerades och bland annat konstaterades det att de högst rankade kriterier som innovationer skall bedömas efter är:

1. Förbättrad prestanda (Better in-use performance).
2. Ökat värde för pengarna (Increased value for money).
3. Minskning av antalet byggfel (Reduced construction defects).
4. Bättre tillfredsställa kundens behov (Improved match with customers' needs).
5. Minskade byggkostnader (Reduced construction costs).

Andra intressanta slutsatser som kunde dras av studien var att: innovationer sågs ge avsevärda kostnadsfördelar och att detta i sin tur kunde leda till lägre kostnader och en ökad produktivitet. Det visade sig att det viktigaste var att byggprocessen förenklades samtidigt som man fick en ökad kontroll och förståelse. De faktorer som ansågs förhindra nytänkande och innovationsklimatet var: konservatism, kostnader, normer och standard, tröghet, och bristen på FoU. Konservatismen var den faktor som rankades högst.

Vad som ofta saknas är en systematisk produktutveckling där suboptimering undviks. För att undvika suboptimering vid utveckling av nya system är det viktigt att ta hänsyn till hela byggprocessen och de arbetsmoment som krävs för att projektera och bygga stommen. För att lyckas måste ett koncept inkludera alla steg i processen (dvs. planering, projektering, tillverkning, transport, montage samt drift och underhåll) och det är viktigt att identifiera, kunderna, deras behov och krav, se Figur 11. Ofta förbises att problem orsakas av fundamentala brister och fel i organisation och/eller i de arbetsmetoder som används. Sarja [9] hävdar att material och konstruktioner måste utformas och vara lämpade för en mekaniserad och automatiserad tillverkning; de måste dessutom kunna skräddarsys för att möta olika behov. Vidare gör Sarja gällande att, för att uppnå detta krävs att utvecklingen inom projektledning och projektering får ett starkt stöd från de grundläggande teknikerna material och konstruktion.



Figur 11. Steg i systematiserad produktutveckling: identifiering av kunder, planering av produktion och marknadspotential.

Stombyggnadsmaterial

De material som traditionellt används för stombyggnad i byggindustrin är stål, betong, trä och sten. Utveckling och förbättring av materialen sker mer eller mindre kontinuerligt, men oftast stegvis. Kraven på de material som används i byggnadsindustrin skiljer sig från de krav som andra industrier kan tänkas ha. Främst genom att de volymer som används är omfattande, vilket har gjort att betong och cement är de av människan gjorda material med störst förbrukning, och att investeringskostnaderna är stora. De flesta byggnadsverk förväntas ha en lång livslängd vilket medför att materialen måste ha en lång och väldefinierad livslängd. För att kunna åstadkomma en utveckling där de krav och önskemål som nämnts tillgodoses är det troligen nödvändigt att utveckla och utnyttja skräddarsydda betonger. Detta för att uppnå de specifika egenskaper som önskas, till exempel gjutbarhet, hållfasthet och seghet. Ett sätt att nå en industriell byggprocess kan vara att använda högpresterande betong, exempelvis höghållfast självkompakterande-fiberarmerad betong, i kombination med kvarsittande-formsystem och samverkanspelare.

Få områden har medfört en så stor utveckling och så många innovationer som materialtekniken. Även inom byggindustrin har det skett en stor utveckling under årens lopp. Men all den potential som finns utnyttjas inte på grund av att innovationer ibland hindras av regelverk och problem inom byggprocessen och branschens fragmentering. I Sverige finns det heller ingen samlad forskning kring utveckling av byggnadsmaterialens mekaniska egenskaper för att åstadkomma högpresterande material. Drivkraften för materialutveckling är att öka materialens kvalitet och prestanda. För byggbranschen behövs, bland annat, funktionella material som kan förenkla byggprocessen, material som har en lång och tillförlitlig livslängd och material som är anpassade för reparation. För detta måste detaljkrav i normer ses över och dimensioneringsmetoder, beräkningsmodeller och standardiserade provningsmetoder för nya material måste tas fram. Viktigt är att materialens mekaniska egenskaper utvecklas utifrån konstruktionstekniska förutsättningar, det vill säga för de konstruktioner de är tänkta att

användas i. Dessutom måste hänsyn tas till den miljövariabeln att materialen skall användas och det faktum att byggnadsmaterial oftast innebär stora volymer, och därmed en låg kostnad per volymenhet. Det finns även ett behov av utvecklingsprojekt för att i industriella tillämpningar undersöka hur ny teknik och nya material ska utnyttjas och implementeras på ett säkert sätt.

Ett resultat av utvecklingen kan vara att material kan designas för att erhålla specifika egenskaper/funktioner, vilket realiserar på materialens micro/nano skala, och optimeras för en önskad strukturens respons. På konstruktions/strukturnivå kan detta innebära en ökad användning och kombination av kompositmaterial, till exempel för att ge önskad och variabel styvhet, som kan variera i olika riktningar för att till exempel erbjuda en ökad omslutning av betongpelare. Kompositmaterial erbjuder även möjligheten till ny armeringsutformning. Med smarta material/konstruktioner är det möjligt att övervaka och mäta konstruktionens beteende under dess livslängd.

Fiberbetong

Den största nackdelen med betong är dess sprödhet vilken gör att uppsprickning av betong sker vid relativt låga spänningar och är således i stort sett oundvikligt. Sprickor är inte estetiskt tilltalande och kan dessutom bidra till en snabbare nedbrytning. Men även den mekaniska verkningssättet påverkas av sprickbildningsprocessen som leder till en gradvis reduktion av styvheten. En ökad seghet kan fås genom tillsats av fibrer, vilka håller ihop uppkomna sprickor. Fibrerna påverkar främst beteendet efter uppsprickning (av betongmatrisen), genom att fibrerna överför kraft över den uppkomna sprickan med en ökad seghet som resultat. Det finns även möjligheten att öka draghållfastheten, för detta krävs dock en hög volymandel fibrer och särskild betongsammansättning. Internationellt finns det ett ökat intresse och användande av fiberarmerad betong, medan det i Sverige främst används i golv. Utvecklingen mot betonger med hög hållfasthet gör fiberapplikationer alltmer intressant. Undersökningar av höghållfast betong har antytt att den ökade sprödheten hos höghållfast betong ofta leder till ökade armeringsmängder (till exempel sprickarmering och byglar) och det är svårt att utnyttja den ökade draghållfastheten. För att kunna dra nytta av höghållfast betong i balkar och plattor kan det vara nödvändigt att öka segheten, brottenergin. Fiberarmering har även möjlighet att bidra till ett industriellt byggsätt genom enklare produktion och en förbättrad prestanda.

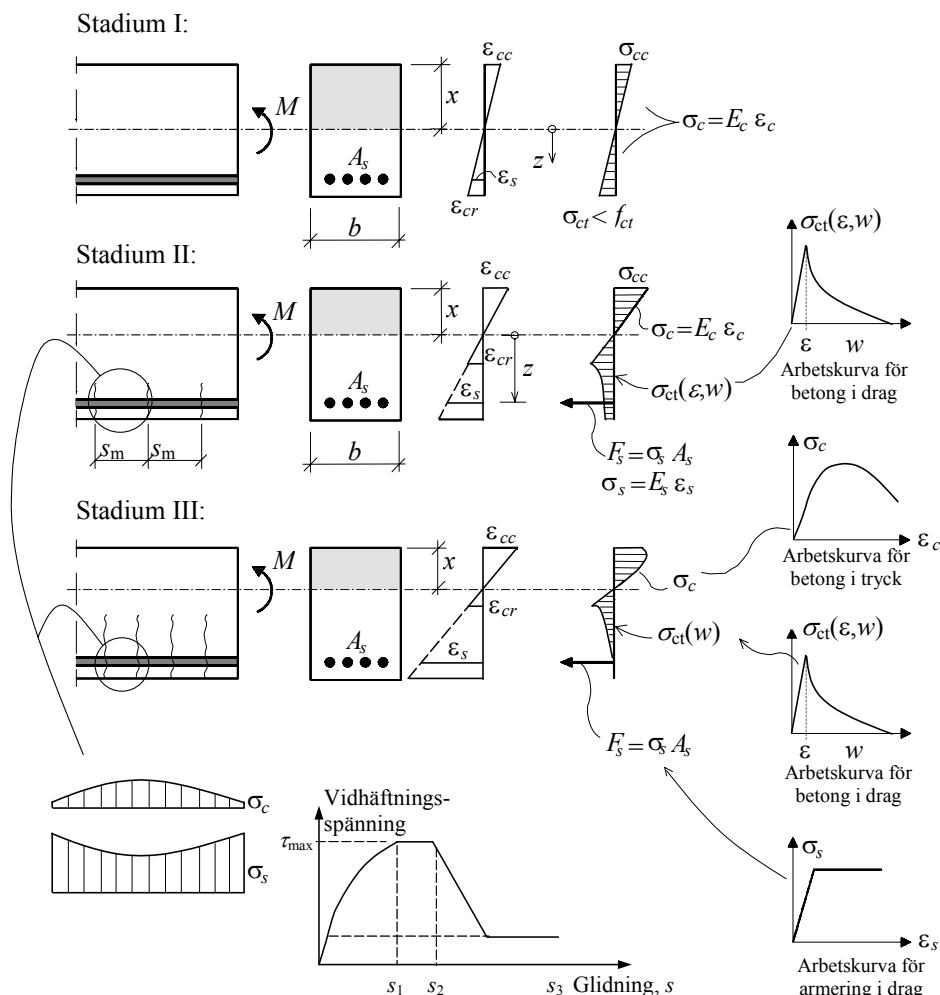
Men för att fibrer skall kunna användas i bärande konstruktioner så måste dimensionering, analys och materialspecifikation systematiseras eftersom antalet parametrar är betydligt fler än för normal betong. Beroende på de styrande mekanismerna, belastningen och konstruktionens geometri kan det vara olika egenskaper som erfordras, och därmed kräver olika sammansättning, fibertyper etc. De största hindren för en ökad användning och utnyttjande av fiberarmerad betong i bärande konstruktioner är:

- Att standardiserade kvantitativa provningsmetoder saknas.
- Att dimensioneringsmetoder och analysmodeller till stor del saknas, eller så är de metoder som används inte tillräckliga för att beskriva det mekaniska verkningssättet.
- Att val av fibrer och betongsammansättning i stort sett baseras på en heuristisk metodik och att de flesta konstruktörer saknar kunskap för specificering av materialegenskaper.
- Materialkostnaden för fibrer är större än för konventionell armering.

Grundforskning inom området har pågått sedan 60-talet men det finns ett behov av tillämpad forskning där, bland annat, fiberbetong undersöks i konstruktions applikationer. Trots all forskning som har genomförts har dagens konstruktörer en ganska begränsad kunskap om

fiberarmerad betong och generella dimensioneringsmetoder för konstruktions applikationer saknas. Ett skäl för detta är att det i praktiken endast är ett fåtal konstruktörer som använder brottmekaniska analys- och dimensioneringsmetoder för betong, något som är viktigt för att kunna tillgodogöra sig fiberbetongens ökade seghet. Vidare är de standardiserade testmetoder som används (t ex ASTM C 1018, etc.) svårtolkade och kan inte enkelt kopplas till materialparametrar eftersom de bygger på ett seghetsindex vid böjprovning av balkar. En nackdel med detta provningsförfarande är att den främst är inriktad på konstruktioner med böjande moment och det är svårt att använda resultatet till dimensionering för rent drag, skjuvning, eller kombinationer av dessa. Dessutom är provningsresultatet beroende av provkroppens storlek.

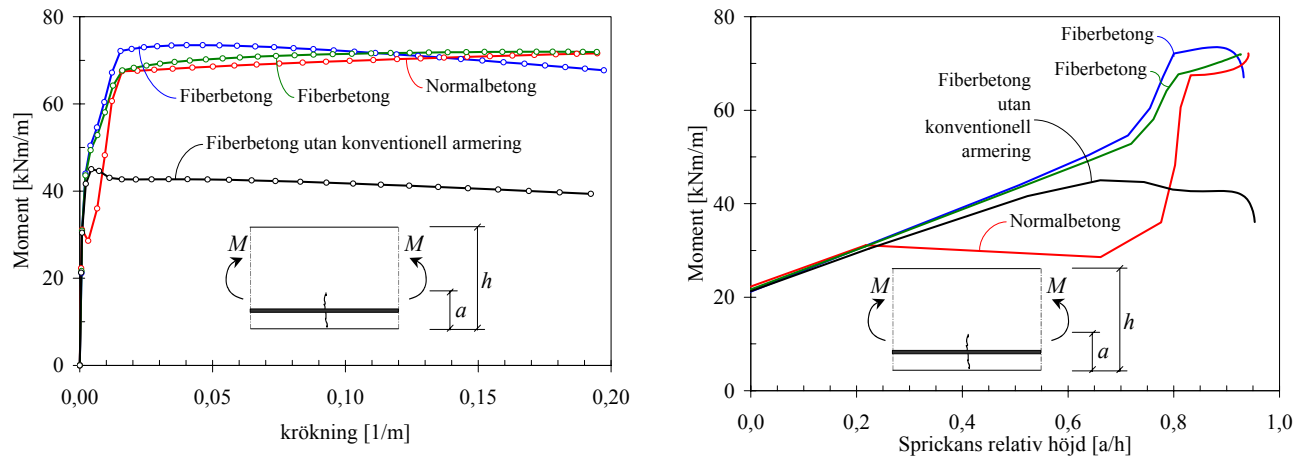
För att kunna modellera och utnyttja materialet så är det nödvändigt att kunna prova och utvärdera materialparametrar och materialegenskaper, för olika typer av fibrer och betongsammansättningar. De materialparametrar som behövs är tryck- och draghållfasthet, elasticitetsmodul, samt samband för spänning-spricköppning ($\sigma_{ct}-w$). De grundläggande parametrarna som krävs visas i Figur 12 tillsammans med modell för tvärsnittsanalys.



Figur 12. Tvärsnittsanalys av ett tvärsnitt där fiberbetong kombineras med konventionell armering.

Ett exempel på effekten av fiberbetong i ett tvärsnitt där det kombineras med konventionell armering kan ses i Figur 13. Ett bjälklag med en tjocklek av 250 mm har analyserats, tvärsnittet

är försett med 0,25% dragarmering för konventionell betong och med 0,1% för fiberbetongen – detta för att tvärsnitten skall ha motsvarande momentkapacitet. Vad som kan noteras är fibrernas inverkan efter uppsprickning och den ökade styvhet som erhålls. Det är också viktigt att påpeka att responsen beror på hur sambandet mellan spänning och spricköppning ser ut. Det är önskvärt att vid ökande deformation/krökning så ökar tvärsnittets momentupptagning. För att få en önskvärd respons och en effektiv konstruktion så är det nödvändigt att optimera de ingående materialens egenskaper, vilket även inkluderar armeringens arbetskurva, och hur materialen kombineras optimalt.



Figur 13. Exempel på hur fiberbetong inverkar på tvärsnittsresponsen vid böjande moment. Bjälklag med en tjocklek av 250 mm, betong C35 och med 0,25% respektive 0,1% armering (konventionell- respektive fiberbetong) (a) Samband mellan moment och krökning. (b) Jämförelse hur en spricka tillväxer vid ökad belastning i fiberbetong och konventionellbetong.

I designarbetet är det emellertid inte trivialt att välja den/de bäst lämpade fibern/fibrerna till en applikation. Utbudet av fibrer är stort, både olika geometrier/dimensioner och material, och deras verkningsätt skiljer sig avsevärt åt. En fiber som är lämplig för industrigolv är kanske inte lämplig som en ersättning för tvärkraftsarmering i balkar. Med vissa fibrer kan det vara nödvändigt att ändra betongens sammansättning, det vill säga de övriga ingredienserna i betongen (t ex ballastens storlek och mängden finmaterial). Men även inom en typ av konstruktion ändras beteendet beroende på geometriska förutsättningar. För till exempel balkar så finner man att fibrernas bidrag är beroende av balkens höjd, dvs. ökningen av böjdraghållfastheten är betydande för låga balkar (en ökning upp till fem gånger har uppmätts) men för höga balkar är ökningen betydligt blygsammare. Men fibrer har även möjlighet att erbjuda ett mervärde genom att bidra till andra funktioner och medföra förbättrad prestanda i t ex tidiga skeden (minska risken för plastiska krympsprickor), för att minska långtidseffekter och vid brand. Det finns även stora fördelar att kombinera självkompakterande betong i kombination med fiberarmering. De produktionstekniska fördelarna är att tunga och arbetskrävande moment, vibrering och montering av armering, försvinner helt eller minskar i omfattning. Men det har visat sig att det även finns konstruktionstekniska fördelar. Dessa är bland annat att det finns en möjlighet att orientera fibrerna så att dessa får en mer optimal fördelning. Den tätare strukturen i självkompakterande betong innebär dessutom att fibrerna får en bättre vidhäftning, vilket är den mekanismen som är avgörande för fiberbetongens egenskaper.

Utbildning

För att driva utvecklingen och vara ledande pågår en ständig förändring och utveckling av konstruktionsinriktningen på V-sektionen, Chalmers. Detta anses vara nödvändigt med tanke på den förändringsprocess som branschen genomgår och med tanke på den ständigt ökade kunskapsbasen. Men det är också nödvändigt för att studenterna skall ha en hög beredskap när de examineras. Gemensamt för institutionens huvudområden gäller att beakta konstruktörens roll inom hela byggprocessen, och därvid ta hänsyn till sambanden mellan projektering, produktion, drift och underhåll, beständighet samt rivning och återvinning. Säkerhet och säkerhetsfilosofi utgör en central del. Hänsyn ska även tas till estetik, uthållighet och miljö, byggeffektivitet och ekonomi. Här avses både konstruktionerna som sådana som själva konstruktionsprocessen. Utbildningen i Konstruktionsteknik ska vara främmande och ge stort utrymme åt generella baskunskaper. Tillämpningskunskaperna profileras mot ökad kunskap och färdighet i konstruktionsmetodik, där problemlösning är en central del. Avsikten är att ytterligare öka intresset för ämnet genom att särskilt framhäva och lägga vikt vid de kreativa och skapande momenten.

De idéer som ligger bakom är att utbildningen skall utgöra en god och stabil grund för ett långvarigt yrkesliv och skall ge:

- helhetssyn om såväl system som konstruktionsprocessen,
- god förståelse för grundläggande verkningssätt och fenomen,
- förståelse för kopplingen mellan modell och verklighet,
- förmåga att ställa upp och välja rätt modell till rätt uppgift, och
- förmåga att arbeta metodiskt och att utnyttja moderna hjälpmedel.

Ett nytt koncept som har introducerats är en synteskurs som pågår under hela årskurs fyra. Kursen är avsedd att ge studenterna en förbättrad kunskap om stommar och den stombyggnadsteknik som används. Synteskursen genomförs i form av fyra etapper som stöds av föreläsningar och övningar som behandlar ämnesövergripande frågor, t ex hus- och brotyper, laster, metoder för stabilisering, krav med hänsyn till produktion, beständighet, miljö, rörelsebehov. Kursen innehåller även studiebesök och gästföreläsningar för att ge verklighetsförankring. Detta har lett fram till att studenterna får en bättre helhetssyn. Genom att studenterna dessutom handleds av yrkesverksamma konstruktörer i delar av kursen får de även en bättre inblick i deras framtida arbetsuppgifter och får en naturlig kontakt med näringslivet.

För att skapa en ökad helhetssyn i det viktiga gränssnittet mellan konstruktion och produktion utsågs nyligen Ingvar Olofsson till adjungerad professor i Produktionsintegrerad konstruktionsmetodik vid Institutionen för konstruktionsteknik. Området berör bland annat hur konstruktionen ska utföras och anpassa utformningen till bästa funktionella och ekonomiska lösning (se: www.chalmers.se/HyperText/Prof-S/Olofsson-S). Ytterligare initiativ som tagits för att stärka konstruktörens roll i arbetsliv och samhälle samt för att öka branschens kompetens är det nybildade Konstruktionscentrum KC.

Sammanfattning

Sammanfattningsvis, att det finns stora utvecklingsmöjligheter för byggbranschen råder det ingen tvekan om. Men en utveckling av ett resurssnålt och industriellt byggande kräver ett ökat samarbete mellan de ingående aktörerna. Det innebär dessutom att hela processen integreras och

att de ingående aktörerna arbetar mot ett gemensamt mål. Dock finns en del problem som måste överbryggas om en utveckling skall kunna ske. Investeringar i forskning och utveckling (FoU) måste öka och detaljkrav i normer måste ses över. Byggprocessen och projekt prioriteringar måste ändras, det går inte längre att enbart fokusera på lägsta upphandlingskostnad. En anledning till detta är att nya och innovativa system ofta erbjuder förbättrad prestanda, längre livslängd och lägre driftskostnader än befintliga systemen. Nya stombyggnadssystem kan, dessvärre, ha en högre initiell kostnad eller kräva en större investering. För utveckling av ny stombyggnadsteknik är nya och förbättrade material en viktig utgångspunkt som kan möjliggöra innovationer. Det är emellertid viktigt att förstå hur konstruktionens funktion och verkningssätt är relaterat till de ingående materialens egenskaper och hur det påverkas av produktionsmetoderna. För att möjliggöra framtida innovationer inom stombyggnadsteknik krävs ökad kunskap och helhetssyn, det är därför mycket viktigt att inse att detta kräver satsningar både på utbildning och på forskning. För att utvecklingen skall lyckas krävs även ett närmare samarbete mellan material- och konstruktionsforskning, och det innebär utmaningar för all aktörer, såsom byggherrar, arkitekter, konstruktörer, materialleverantörer, entreprenörer, etc.

[1] Betongbanken (2000): Byggdata sammanställt av Svenska Fabriksbetongföreningen – data mottaget från Frank Johansson 02-05-00.

[2] Wengholt Johnsson, H (2001): Totalekonomiska konsekvenser vid val av betongbjälklag, FoU-Väst Rapport 0103.

[3] Building Research Establishment (2001): Flat slabs for efficient concrete construction, Best Practice Guides for In-situ Concrete Frame Buildings, (downloadable at www.rcc-info.org.uk).

[4] Löfgren, I: (2002) In-situ concrete building systems - Developments for industrial construction. Licentiate Thesis Publication 02:2, Departement of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, February 2002, 138 pp.

[5] Löfgren, I and Gylltoft, K: In-situ cast concrete building: Important aspects of industrialised construction , *Nordic Concrete Research*, 1/2001, 2001, pp. 61-81.

[6] Löfgren, I: Industriellt platsgjutet byggande: Principer och metoder för industrialisering. *Bygg & Teknik*, 2/2001, pp. 60-64.

[7] Johansson, M.: *Composite Action and Confinement Effects in Tubular Steel-Concrete Columns*, Doktorsavhandling, Publikation 02:8, Institutionen för konstruktionsteknik, Betongbyggnad, Chalmers tekniska högskola, November 2002, 77 sidor, appendix + 5 artiklar.

[8] Glass, J., Baiche, B., Jenks, M. and Woodhead, R. (2001): Perspective on innovation in architecture, engineering and construction. Proceedings from the 1 st international conference on innovation in architecture, engineering and construction 18-20th July, 2001, Loughborough, pp. 57-67.

[9] Sarja, Asko (1998): Open and Industrialised Building. CIB Publication 222, Report of Working Commission W24. E & FN Spon. London.